



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VÝVOJ MAC PROTOKOLU PRO BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

MAC PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Michálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Červenka, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tomáš Michálek

ID: 134559

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj MAC protokolu pro bezdrátové senzorové sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh energeticky úsporného MAC protokolu pro bezdrátové senzorové sítě dle standardu IEEE 802.15.4. Řešeným problémem je zajištění komunikace mezi uzly s co nejmenší spotřebou energie a přitom s minimálním zpožděním. V rámci semestrální práce dojde k podrobné studii současných MAC protokolů a výběru minimálně pěti vhodných protokolů, které budou detailně popsány. Nejvhodnější z nich budou objektivně srovnány např. pomocí simulace. Referenčním protokolem je X-MAC. Hodnocen bude výběr protokolů i způsob srovnání. Součástí práce je návrh a implementace vlastního či adaptovaného protokolu na reálné zařízení a změření jeho vlastností. K dispozici jsou zařízení s funkční implementací přenosového protokolu i paketový analyzátor.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] S. KUMAR, T. BASAVARAJU a C. PUTTAMADAPPA. Ad hoc mobile wireless networks: principles, protocols, and applications. 2nd ed. Boca Raton: Taylor, 2013, 335 s. ISBN 978-1-4665-1446-1.
- [2] S. KUMAR, T. BASAVARAJU a C. PUTTAMADAPPA. Wireless sensor networks: current status and future trends. Online-Ausg. Boca Raton, FL: Taylor, 2013, 335 s. ISBN 1466506067.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 25.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Červenka, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na úvod do problematiky bezdrátových senzorových sítí a přibližuje čtenáři jednotlivé aspekty při řešení problémů v těchto sítích. Práce se blíže zaměřuje na energetickou náročnost při komunikaci mezi zařízeními v síti a popisuje příčiny nadměrné spotřeby energie. Také řeší mechanismy na úsporu energie a dále se zabývá dnešními protokoly, které svým navržením přispívají k řešení problematiky. Autor v práci dále navrhuje adaptovaný protokol, založený na získaných poznatcích z předchozích teoretických pramenů.

Keywords: bezdrátové senzorové sítě, IEEE802.15.4, MAC vrstva, duty-cycle protokoly, MAC protokoly, vícenásobný přístup k médium, energetická spotřeba, IRIS

ABSTRACT

The work focuses on introduction to the topic of wireless sensor networks and brings readers the various aspects of problem solving in these networks. Work is closely focused on the energy performance when communicating between devices on a network and discusses the causes of excessive energy consumption. It also addresses the mechanisms for saving energy and is also engaged today protocols that its contribution to proposing solutions to problems. The author had also proposes an adapted protocol, based on lessons learned from previous theoretical sources.

Keywords: wireless sensor networks, IEEE802.15.4, MAC layer, duty-cycle protocols, MAC protocols, multiple access, energy consumption, IRIS

MICHÁLEK, T. Vývoj MAC protokolu pro bezdrátové senzorové sítě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 42 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Červenka, Ph.D.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vývoj MAC protokolu pro bezdrátové senzorové sítě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Děkuji vedoucímu práce Ing. Vladimíru Červenkovi, Ph.D. za poskytnuté cenné rady při konzultacích a pomoc při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Obsah	8
Úvod	10
1 Bezdrátové senzorové sítě	11
1.1 Systémy dle IEEE802.15.4	11
1.1.1 Síťová topologie.....	12
1.1.2 Fyzická vrstva u IEEE802.15.4	12
1.1.3 MAC vrstva u IEEE802.15.4.....	12
2 Spotřeba a úspora energie MAC protokolů v sítích WSN	14
2.1 Hlavní příčiny spotřeby energie v sítích WSN	14
2.1.1 Kolize (Collisions).....	14
2.1.2 Přeslechy (Overhearing)	14
2.1.3 Režie (Overheads).....	14
2.1.4 Nadbytečné naslouchání (Idle listening).....	14
2.2 Mechanismy úspory energie v sítích WSN.....	15
2.2.1 Redukování kolizí	15
2.2.2 Redukce přeslechů	15
2.2.3 Redukce režii	15
2.2.4 Redukce nadbytečného naslouchání	15
3 Kategorie mac protokolů	16
3.1 Protokoly s technikou Duty cycle	16
3.1.1 Contention based protokoly	16
3.1.2 Reservation based protokoly	17
3.1.3 Hybrid based protokoly	17
3.2 Synchronní protokoly	17
3.3 Asynchronní protokoly	18
4 Vybrané MAC protokoly	20
4.1 S-MAC.....	20
4.2 T-MAC.....	20
4.3 X-MAC	21

4.4	PW-MAC	22
4.5	WISE-MAC	22
4.6	CH-MAC	23
4.6.1	Přenos dat u CH-MAC protokolu	24
4.6.2	T rámec	24
4.6.3	Srovnání parametrů CH-MAC protokolu	25
4.7	WX-MAC	25
4.7.1	Struktura protokolu WX-MAC	25
4.7.2	Srovnání parametrů WX-MAC protokolu	26
5	Návrh protokolu	28
5.1	Použití bezdrátové senzorové sítě	28
5.2	Návrh hybridního protokolu	29
5.2.1	Postup při přenosu dat:	30
6	Implementace protokolů	31
6.1	Zařízení	31
6.1.1	IRIS – XM2110	31
6.1.2	MIB520	33
6.2	Implementace	33
	Závěr	34
	Seznam obrázků	35
	Seznam tabulek	36
	Seznam literatury	37
	Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů	39
	Seznam příloh	41
	Obsah dat na přiloženém DVD	42

ÚVOD

Bezdrátové senzorové sítě jsou novou oblastí výzkumu a mají velký potenciál, co se použití v praxi týče. Možnosti využití v každodenním životě každého z nás jsou nesmírné, ještě větší však nabízí možnosti v použití monitorování důležitých systémů, kde je obtížné nebo nákladné vést kabelovou trasu se zdrojem energie. Mnoho výzkumných projektů se zaměřuje na rozvoj a aplikaci bezdrátových senzorových sítí. Inteligentní budovy a města budou v budoucnu zcela určitě využívat bezdrátových sítí, průmyslové odvětví již dnes zapojuje do provozu bezdrátové sensory na zlepšení bezpečnosti a efektivity výrobního procesu. Obrovské možnosti se naskýtají ve zdravotnictví, kde se implementují do těla pacienta nebo na jeho povrch miniaturní bezdrátové sensory, monitorující jeho stav a přispívající ke zlepšení kvality lékařské péče.

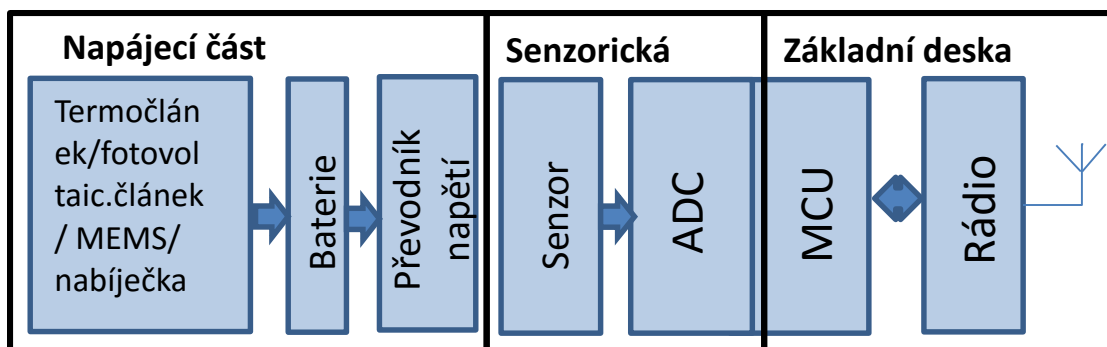
Tyto skutečnosti motivují firmy do vývoje nových, miniaturních zařízení, které navíc dosahují snížené spotřeby energie a tak mohou bez vnějšího zásahu fungovat měsíce až roky. Avšak hardwarová stránka není to jediné, co lze zlepšovat. Existuje a vyvíjí se mnoho algoritmů a technik na zdokonalení požadovaných parametrů zařízení, jako například snížení odezvy při komunikaci, adaptace na velikost provozu na síti či energetická náročnost těchto zařízení. Právě poslední zmíněný případ je obsahem této práce.

Teoretické znalosti popisující princip a podstatu bezdrátových senzorových sítí jsou uvedeny v první kapitole. Čtenář se tak seznámí s úvodem do problematiky a dostane přehled o používaných komponentech v sítích. Dále diplomová práce souhrnně popisuje standard IEEE802.15.4, který vytváří ucelené a jednotné pravidla pro řízení a funkčnost bezdrátových senzorových sítí. Tento standard definuje základní vrstvy referenčního modelu ISO/OSI, konkrétně popisuje fyzickou vrstvu a subvrstvu zodpovědnou za řízení přístupu k médiu, MAC vrstvu. Právě na této vrstvě operují MAC protokoly, které mohou svým fungováním podstatně změnit spotřebu energie při komunikaci. Tyto protokoly používají různé algoritmy známé z jiných modelů sítí, které vedou ke snížení spotřeby energie. V kapitole 2 této práce jsou popsány nejčastější problémy, které zapříčiňují plýtvání energie při komunikaci a dále jsou rozebrány protiopatření proti těmto problémům. MAC protokoly práce popisuje a rozděluje do skupin podle fungování (kapitola 3) a dále detailněji popisuje vybrané současné protokoly. Autor dále nastiňuje úvahu při návrhu MAC protokolu a navrhuje vlastní adaptovaný protokol, který přejímá pozitivní vlastnosti popsanych protokolů a popsanych teoretických mechanismů.

Tato práce si klade za úkol seznámit čtenáře s bezdrátovými senzorovými sítěmi, jakožto i s největší problematikou, která se v nich vyskytuje. Čtenář získá potřebné znalosti k pochopení popsanych problémů a v 6 kapitolách práce se dozví informace od základu až po návrh protokolu.

1 BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ

Bezdrátové senzorové sítě (Wireless sensor networks – WSN) se skládají z mnoha malých uzlů, takzvaných nodů senzorových sítí, které jsou v síti rozmístěny pravidelným nebo náhodným způsobem a mezi kterými probíhá přenos dat pomocí rádiového média. Rozlehlost takové sítě může být od několika uzlů až po teoreticky neomezené množství. Jedná se tedy o systémy, které mohou pracovat autonomně a bez stálého přívodu napájení. Takovými systémy jsou například zařízení monitorující životní funkce pacienta v nemocnici, systém snímající parametry na nosnících mostu nebo systém pro upozornění dostupnosti parkovacího místa. Bezdrátové senzorové sítě tedy nejen že eliminují vysoké náklady kabelových spojů a jejich instalace, ale zároveň zajišťují i vysokou flexibilitu přenosu dat. Jelikož jsou uzly WSN napájeny bateriemi, je tak často obtížné, kvůli jejich složitému umístění a provedení, baterie vyměnit nebo dobít. Základní myšlenkou WSN je tedy maximální úspora energie a vysoká flexibilita přenosu dat. Uzel se obecně skládá ze senzorové části, výpočetní části, napájení a rádiového modulu (viz Obrázek 1). [1][2]



Obrázek 1 - Blokové znázornění zařízení ve WSN

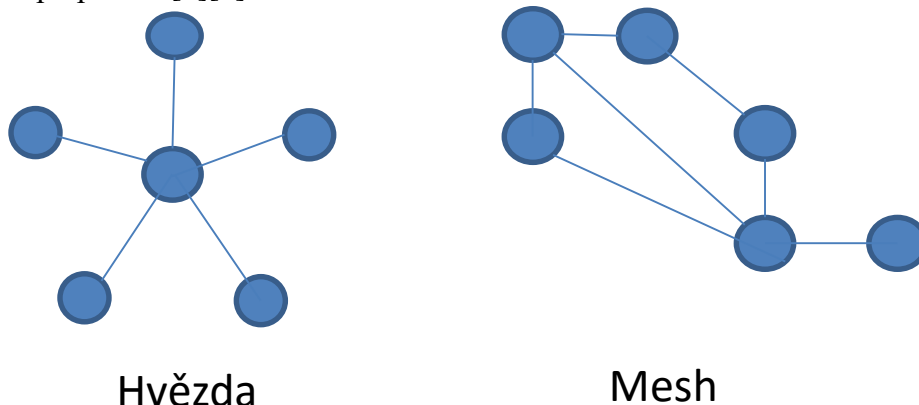
S postupnou miniaturizací elektronických zařízení se dostaly do popředí systémy, které fungují dle standardu IEEE802.15.4. Tyto zařízení mají obvykle nízký proudový odběr (do několika desítek mA) a využívají mechanismy pro další snížení spotřeby energie, kterým je například vypínání nepotřebných obvodů či redukce kolizí.

1.1 Systémy dle IEEE802.15.4

Dle standardu 802.15.4, který byl navržen institutem IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), funguje řada bezdrátových komunikačních technologií včetně populárních ZigBee, WirelessHART i MiWi. Standard IEEE802.15.4 popisuje fyzickou a MAC (Medium Access Control) vrstvu pro bezdrátová zařízení s malým dosahem (LR-WPAN = Low Rate Wireless Personal Area Network), tedy pouze první 2 vrstvy referenčního modelu ISO/OSI. Standard se zabývá nízkodatovým přenosem dat v bezlicenčním pásmu u zařízení s předpokládanou životností napájení několik měsíců až let.[3][4]

1.1.1 Síťová topologie

Dle standardu IEEE802.15.4 pracuje MAC vrstva se dvěma topologiemi: Hvězda a Mesh (viz Obrázek 2). U topologie hvězda existuje centrální uzel a ostatní uzly komunikují přímo s ním. Centrální uzel je značně vytížen, a proto je neustále napájen. Slouží také jako sběrný bod pro nasbíraná data od sousedních uzlů. Topologie Mesh je oproti hvězdě decentralizovaná, uzly jsou propojené vzájemně tak, jak jen to dovolí podmínky (každý s každým v dosahu). Pokud jsou uzly v rádiovém dosahu, jsou propojeny přímo. Pokud jsou mimo dosah, mohou komunikovat nepřímo přes své sousedy (tzv. next hop), kteří zprávu přepošlou.[3][4]



Obrázek 2 - Používané topologie ve WSN

1.1.2 Fyzická vrstva u IEEE802.15.4

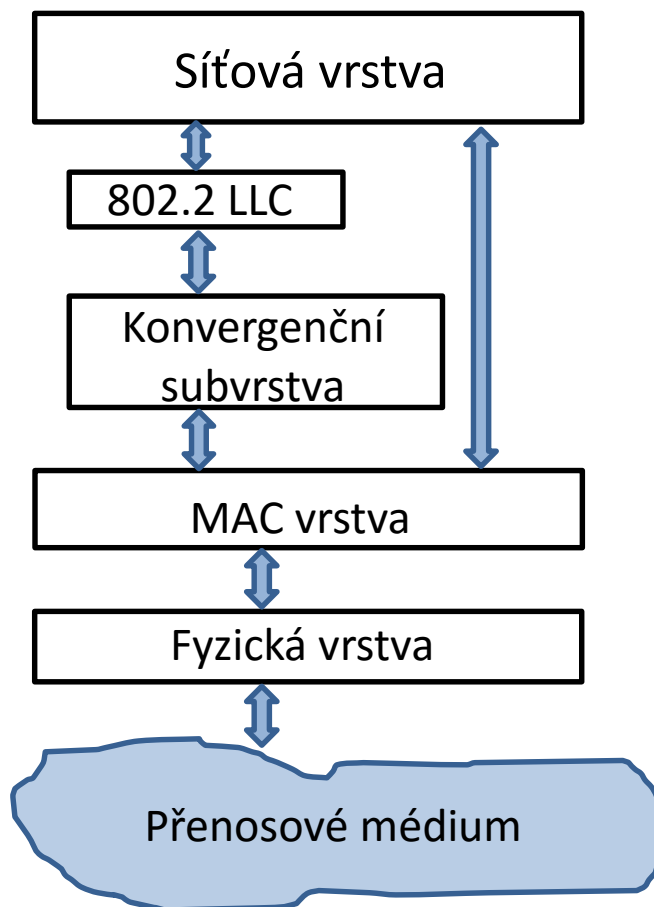
Tato vrstva popisuje vlastnosti rádiového kanálu, který je použit pro přenos dat. Fyzická vrstva IEEE802.15.4 má na starost aktivaci a deaktivaci rádiové části senzoru a taktéž je odpovědná za výběr frekvenčního kanálu, odesílání a příjem dat.[5]

1.1.3 MAC vrstva u IEEE802.15.4

Standard IEEE802.15.4 popisuje pouze MAC a fyzickou vrstvu. Jak ukazuje Obrázek 3, pro další komunikaci s vyššími vrstvami se používá konvergenční subvrstva, následuje 802.2 LLC (Logical Link Control) subvrstva a dále síťová vrstva. MAC vrstva řídí přístup na sdílené přenosové médium, ve WSN se jedná o rádiový kanál. Existuje několik druhů přístupu k médiumu, tyto jsou popsány v kapitole 3. MAC vrstva také kontroluje a potvrzuje správnost přijatých dat. Datové jednotky na MAC vrstvě se říká rámec (frame) nebo také MPDU (Mac Protocol Data Unit). Mezi služby poskytované MAC vrstvou patří:

- Řízení přístupu k přenosovému médium
- Kontrola a potvrzování datových rámců
- Přidávání uzlů do sítě
- Napomáhání efektivnímu sdílení přenosového média

Zvlášť důležitý je poslední bod, jelikož MAC protokoly mohou obsahovat mechanismy, díky kterým zlepši efektivitu využití a sdílení přenosového média a tím zvýší životnost celé bezdrátové sítě.[3]



Obrázek 3 - Přehled vrstev u standardu IEEE802.15.4

MAC protokoly mají za úkol kontrolovat spotřebu energie při vysílání mezi jednotlivými uzly, které je v celém procesu přenosu dat energeticky nejvíce náročné. Tyto protokoly redukují spotřebu energie porovnáváním výkonnostních parametrů jednotlivých uzlů (kolize, přeslechy, režie, nadbytečné naslouchání), čímž zároveň prodlužují životnost celé bezdrátové sítě. Každý MAC protokol má svá vlastní pravidla pro přerušení či zahájení vysílání mezi jednotlivými uzly. Některé MAC protokoly mají pevný pracovní cyklus, zatímco jiné jsou přizpůsobeny komunikaci různě rozložených uzlů, čímž mohou opět redukovat spotřebu energie při přenosu dat.

IEEE802.15.4 používá pro identifikaci zařízení zkrácenou adresu. Jedná se o 16 bitovou adresu zařízení, která je generována koordinátorem sítě (nebo zařízení vygeneruje svou adresu a požádá o schválení). Taktéž může existovat globální adresa zařízení a ta má velikost 64 bitů a je celosvětově unikátní. Skládá se z 24 bitů přidělených výrobcem nebo dodavatelem a zbylých 40 bitů je pro adresu zařízení. Aby se uspořila energie, používá se většinou kratší, 16 bitové adresy.[3]

2 SPOTŘEBA A ÚSPORA ENERGIE MAC PROTOKOLŮ V SÍTÍCH WSN

2.1 Hlavní příčiny spotřeby energie v sítích WSN

2.1.1 Kolize (Collisions)

Podobně, jako dochází ke kolizím na sdílené lince, může dojít ke kolizi i na rádiovém kanálu. Kolize vznikají souběžnou komunikací dvou nebo více uzlů. Může se jednat o posílání zprávy z uzlu A do uzlu B a zároveň z uzlu C do B. Tímto vzniká interference rádiových signálů a dochází ke kolizi, tedy chybovosti přijatých dat. Tento negativní jev vzniká pouze při komunikaci na sdíleném médiu, ať už se jedná o rádiové prostředí nebo sdílenou linku. Při vzniku kolize musí přijímač požádat o opakovaný příjem dat (nebo nepošle potvrzovací rámec ACK = Acknowledgment a přenos se opakuje), přenos se musí opakovat a energie při odeslání a přijetí se spotřebovala zbytečně. [4][7][8]

2.1.2 Přeslechy (Overhearing)

Přeslechy jsou jev, kdy přijímač přijme zprávu a následně zjistí, že zpráva není určena pro něj. Dochází tedy k situaci, kdy přijímač naslouchá na kanále, zaznamenaná preamble¹, a tak naslouchá dále, dokud preamble neskončí a nezačne samotný přenos dat. Až po přijetí prvního datového rámce přijímač zjistí, že zpráva je určena pro jiný uzel a tak ji zahodí. Opět je zde spotřebována energie zbytečně, jelikož senzor přijme rámec, který pro něj není relevantní. Přeslechy těchto informací jsou jednoduše ztrátou energie a bývají charakteristické pro husté sítě s mnoha uzly, jejichž rozsahy příjmů se vzájemně překrývají. [4][7][8]

2.1.3 Režie (Overheads)

Režijní rámce jsou důležité při zahájení a ukončení spojení mezi jednotlivými uzly, avšak na druhou stranu tvoří část provozu, která není pro samotný uzel důležitá (nejsou to data). Proto je vhodné režijní provoz co nejvíce omezit, aby se ušetřila energie a taktéž aby se zmenšil čas, po který uzel obsazuje sdílené přenosové médium. [4][7][8]

2.1.4 Nadbytečné naslouchání (Idle listening)

Ne vždy senzor naslouchá, jestli někdo vysílá, přesně v době kdy někdo skutečně vysílá. Děj, při kterém je senzor v aktivním režimu a naslouchá a přitom zaznamenaná na rádiovém kanále pouze šum (tedy nikdo nevysílá) je nadbytečné naslouchání. [4][7][8]

¹ posloupnost dat sloužící k upozornění na následující vysílání

2.2 Mechanismy úspory energie v sítích WSN

2.2.1 Redukování kolizí

Kolize lze redukovat použitím techniky CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) nebo techniky MACA (Multiple Access with Collision Avoidance). Technika CSMA/CA pracuje na principu zjištění obsazenosti média před samotným zahájením přenosu dat. Pokud si chtějí dva uzly poslat data, musí nejprve vytvořit kontrolní rámec, tedy požadavek o zaslání a souhlas o potvrzení přenosu dat. Musí dojít k poslání rámce RTS (Request to send) do vysílajícího uzlu a rámce CTS (Clear to send) od přijímajícího uzlu. Technika MACA vylepšuje předchozí techniku použitím libovolné pauzy před vysíláním samotných dat, po kterou bude uzel čekat.

Další možností redukce kolizí je použití jedné z technik vícenásobného přístupu, kterými jsou TDMA (Time Division Multiple Access), CDMA (Code Division Multiple Access) nebo FDMA (Frequency Division Multiple Access).[4][7][8]

2.2.2 Redukce přeslechů

Redukci přeslechů můžeme dosáhnout použitím techniky PAMAC (Power Aware Multiple Access with Signaling) založené na technice MACA, ale využívající jiného kanálu pro RTS/CTS výměnu. Pokud tedy data nejsou pro daný uzel relevantní, uzel vypne kanál, aby předešel zbytečné ztrátě energie.[4][7][8]

2.2.3 Redukce režii

Pokud mají mezi sebou dva uzly již navázáno spojení, nemusí díky použití techniky CSMA/ARC (Carrier Sense Multiple Access/Adaptive Rate Control) posílat kontrolní rámec RTS/CTS. Tím komunikující uzly částečně omezí provoz režijních rámců a ušetří energii i čas, po kterou zabírají sdílené přenosové médium. [4][7][8]

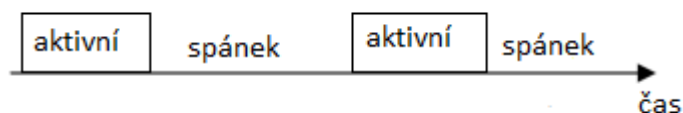
2.2.4 Redukce nadbytečného naslouchání

Senzorový uzel se přepíná do režimu spánku tak často, jak je to jen možné díky technice Power Save Mode. Uzel se zapíná v případě, kdy chce přijímat nebo naslouchat komunikaci. Důležitá je také snaha uzlu o co nejpresnější čas vzbuzení, podle časového rozvrhu souseda, se kterým chce daný uzel komunikovat. Uzly při této technice využívají výměnu časového rozvrhu (sampling schedules) anebo predikci času buzení.[4][7][8]

3 KATEGORIE MAC PROTOKOLŮ

3.1 Protokoly s technikou Duty cycle

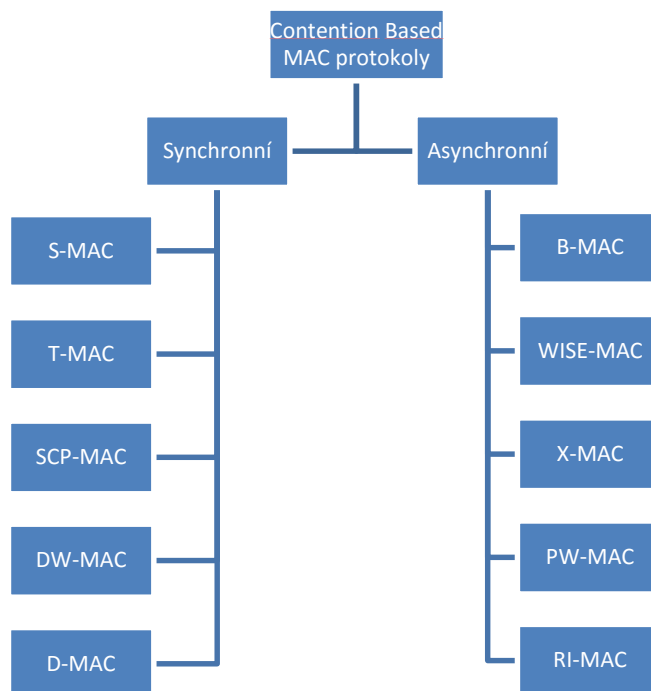
Duty cycle je mechanismus úspory energie při komunikaci uzlů pomocí přepínání mezi aktivním (active) režimem a režimem spánku (sleep) těchto uzlů. Na základě tohoto mechanismu jsou protokoly rozděleny do dvou skupin: synchronní a asynchronní. [6]



Obrázek 4 - Aktivní a spací režim protokolu s technikou Duty cycle

3.1.1 Contention based protokoly

Jedná se o skupinu protokolů založenou na technice soupeření o přenosové médium. Pokaždé, když chce uzel předat informaci jinému uzlu, naslouchá na dostupném komunikačním kanálu, aby zjistil, jestli je kanál volný nebo je již zabrán jiným uzlem. Pokud takový kanál není volný, odloží uzel přenos dat, aby nedocházelo k interferenci s již vysílajícím uzlem. Se vzrůstajícím přenosem dat anebo se zvyšujícím se počtem uzlů, klesá výkonost těchto protokolů. [7][8]



Obrázek 5 - Rozdělení Contention based protokolů na synchronní a asynchronní

3.1.2 Reservation based protokoly

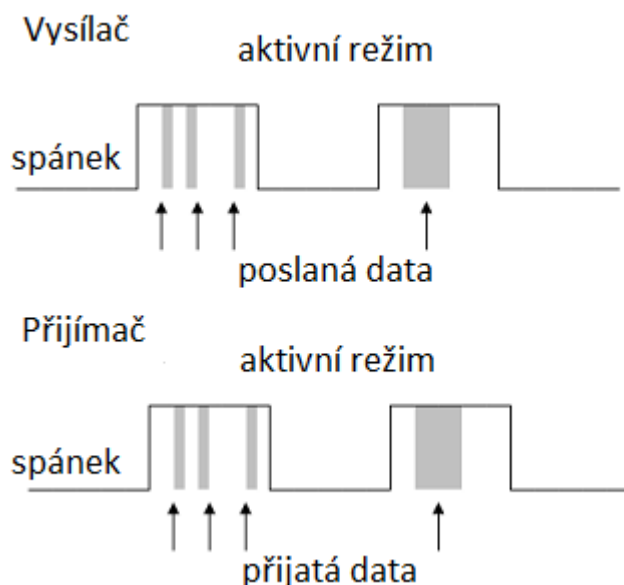
Aby mohly mezi sebou senzorové uzly reservation based protokolu komunikovat, musí znát topologii celé komunikační sítě. Tyto protokoly využívají techniky TDMA, ve které jsou data rozdělena do jednotlivých časových slotů, přičemž každý uzel má jeden vyhrazený (rezervovaný) slot. Tyto protokoly tak řeší kolizi rámců, ale jejich nevýhodou je, že mají menší propustnost a je zde nutná znalost celé komunikační sítě a přesná synchronizace uzlů. [7]

3.1.3 Hybrid based protokoly

Tato kombinace využívá výhod obou výše zmíněných protokolů. Hybridní protokoly rozdělují komunikační kanál na dvě části. Na kontrolní část (channel control) a na datovou část. V kontrolní části jsou data posílána náhodným způsobem, kdežto v datové části jsou data posílána zvlášť ve slotech. Výhodou tohoto přenosu dat je úspora energie a lepší propustnost než u předchozích dvou metod. [7]

3.2 Synchronní protokoly

Synchronní protokoly synchronizují aktivní režim a režim spánku jednotlivých komunikačních uzlů. Tímto způsobem synchronní protokoly účinně snižují trvání a energetickou spotřebu nadbytečného naslouchání uzlů. V těchto protokolech probíhá komunikace a přenos dat mezi uzly pouze v případě předchozího navázání vzájemného spojení. Dochází tak k přímé komunikaci mezi dvěma uzly. Ty uzly, které nepřijímají ani nevysílají žádná data, se přepnou do režimu spánku a takto šetří svou energii.[9]



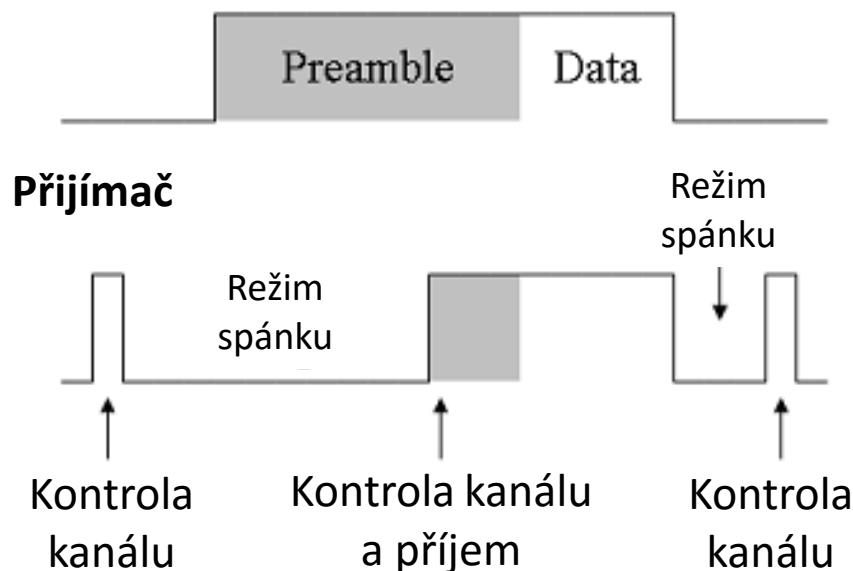
Obrázek 6 - Přenos dat u synchronních protokolů

3.3 Asynchronní protokoly

Tento typ protokolů umožňuje komunikaci mezi uzly bez jejich předchozí synchronizace. Asynchronní protokoly používají metodu LPL (Low Power Listening), v kombinaci s metodou Preamble Sampling. [9]

U metody Preamble Sampling odesílatel vysílá tzv. preamble, což je zpráva, která má ostatní uzly upozornit na skutečnost, že odesílatel vysílá. Zpráva předchází vlastním datům a musí trvat déle, než je budicí interval příjemce. Příjemce se budí v náhodných intervalech a ihned po probuzení zjišťuje, jestli je na kanále nějaký provoz. Pokud ne, přepne se do režimu spánku. Pokud nějaký provoz detekuje, naslouchá tak dlouho, dokud nepřijme celou zprávu nebo dokud nevyprší čas jeho aktivního intervalu. Asynchronní protokoly používají různé metody úpravy preamble k dosažení větší úspory energie. Novější protokoly dosahují vyšší propustnosti dat zavedením vyvolání přenosu příjemcem.

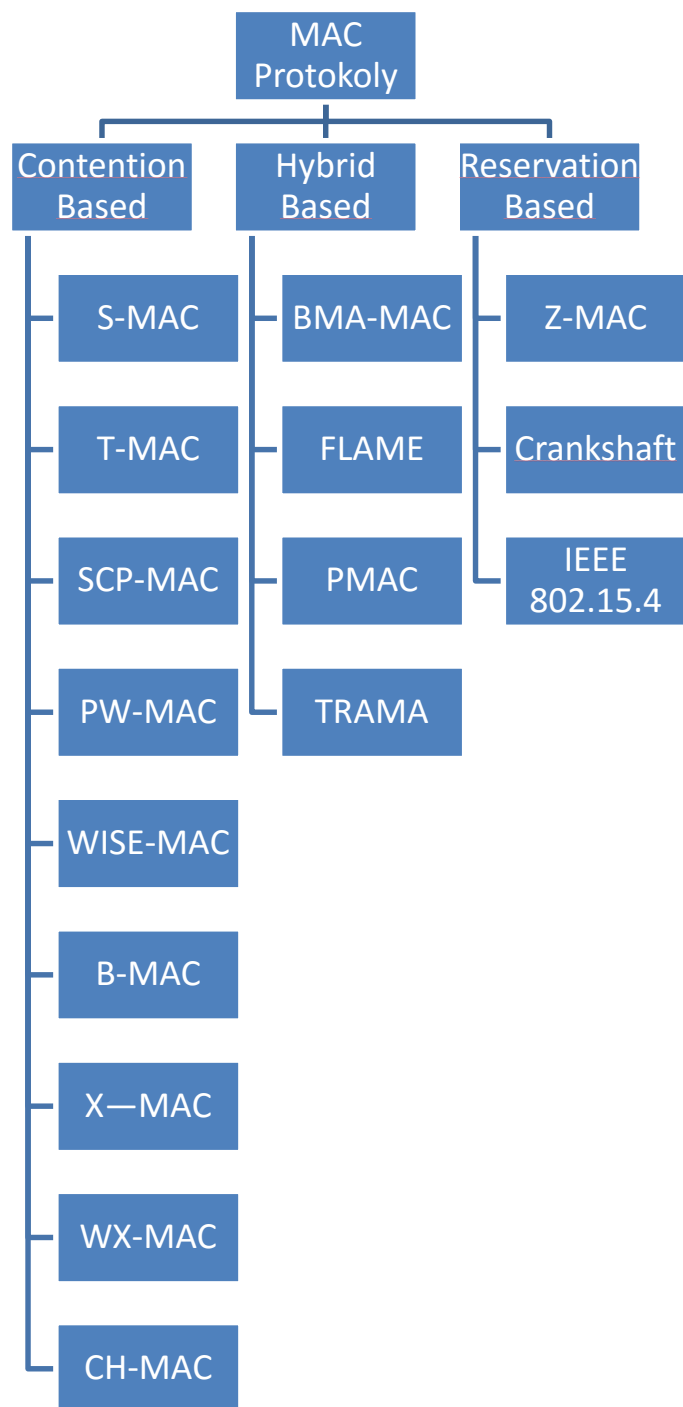
Vysílač



Obrázek 7 - Přenos dat u asynchronních protokolů

U metody LPL uzly po probuzení snímají úroveň přijatého signálu. Uzel takto snímá několik vzorků signálu, a pokud jsou tyto vzorky konstantní, jedná se o vysílání sousedního uzlu. Pokud se vzorky od sebe liší, jsou proměnlivé, jedná se o šum a přenosové médium je volné.

Podstatou asynchronních protokolů je, že přijímací i odesílací uzly kompletně eliminují synchronizaci a jejich aktivní a spací cykly jsou rozdílné.

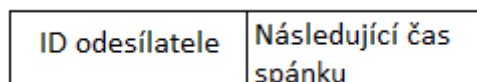


Obrázek 8 - Přehled a členění MAC protokolů

4 VYBRANÉ MAC PROTOKOLY

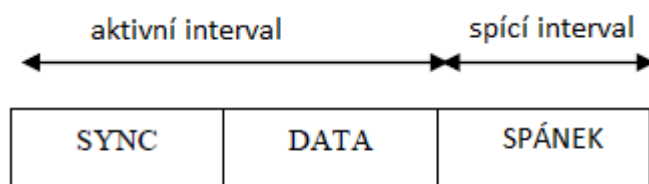
4.1 S-MAC

S-MAC protokoly patří mezi protokoly, které jsou závislé na přesné synchronizaci aktivního režimu a režimu spánku jednotlivých uzlů. Patří tedy do skupiny synchronních MAC protokolů.[10]



Obrázek 9 - SYNC rámeček S-MAC protokolu

V těchto protokolech se senzorové uzly periodicky, na určitý čas, dostávají do režimu spánku. Po této době přechází uzly do aktivního režimu, ve kterém naslouchají na dostupném kanále a sledují, jestli se nepokouší jiný uzel poslat data. Během režimu spánku musí mít senzorový uzel vypnuté rádio. S-MAC protokoly využívají SYNC rámeček (viz Obrázek 10), který synchronizuje režim spánku, aktivní režim a samotný přenos dat. Aby nedocházelo k přílišné ztrátě energie v aktivním režimu při naslouchání případnému přenosu dat, využívají S-MAC protokoly duty-cycle a dále techniku CSMA/CA.[7]



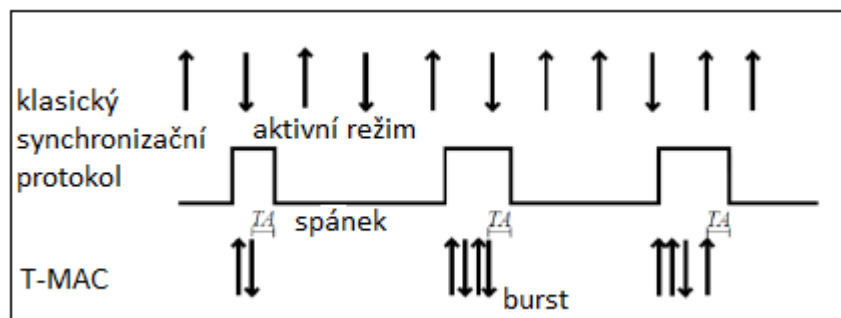
Obrázek 10 - Struktura S-MAC rámce

4.2 T-MAC

T-MAC je duty-cycle synchronní protokol, který vysílá data po balíčcích (tzv. burstech²) variabilní délky (viz Obrázek 11). Uzly se periodicky budí a komunikují se sousedy a používají kontrolní rámce RTS, CTS a ACK. To zajišťuje vyhnutí se kolizím a spolehlivý přenos dat. Vysílaná data jsou nejprve uložena v bufferu³, následně se vytvoří rámeček a ten se pošle. To vše v aktivním režimu. V momentě, kdy už nejsou žádná další data k poslání, se spustí časový odpočet TA a pokud není odpočet přerušen nutností poslat data, po skončení odpočtu je aktivní režim ukončen. Díky tomu má T-MAC protokol adaptivní délku trvání aktivního režimu, na rozdíl od S-MAC. [11]

² Bursts – dávka, větší objem dat poslaný během krátké periody

³ Buffer – krátkodobý zásobník pro data, ze kterého se data dále používají

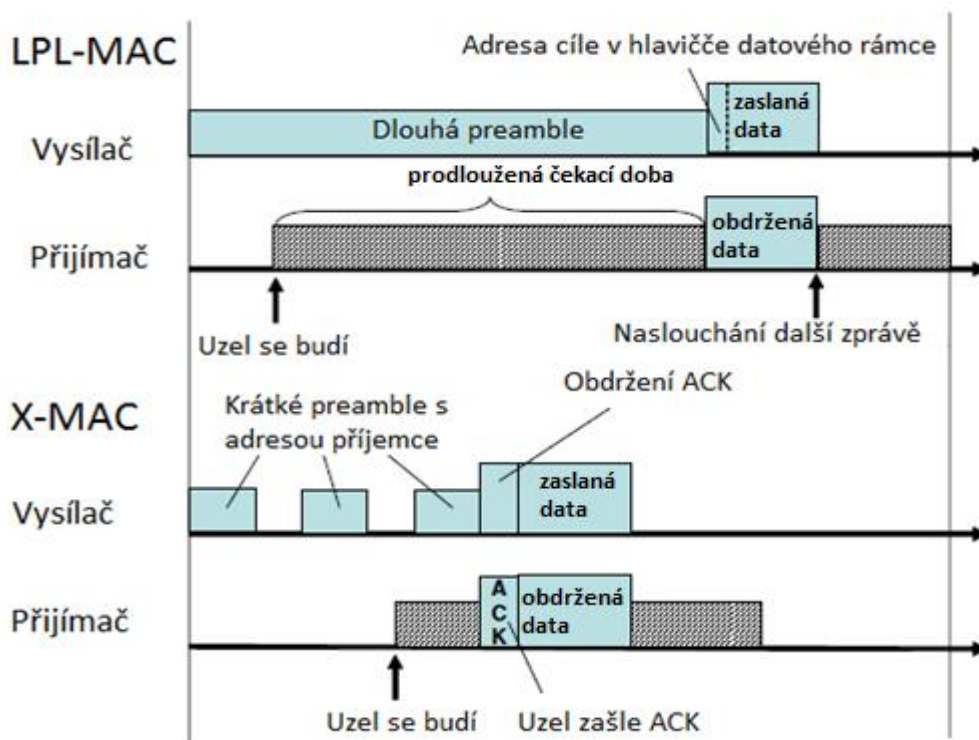


Obrázek 11 - Duty cycle T-MAC protokolu

Jak jde vidět z obrázku, normální MAC protokol má střídání aktivního a spacího režimu pravidelné, kdežto T-MAC protokol má délku aktivního režimu proměnlivou, závislou na tom, jestli se ještě odesílají nebo mají odeslat/přijmout další data. Pokud uzel neprovádí žádnou akci po dobu trvání T_A , přepíná se do režimu spánku.

4.3 X-MAC

X-MAC je rozšířeným asynchronním duty-cycle protokolem. Na rozdíl od jiných protokolů, které používají dlouhou preamble, využívá X-MAC preamble rozdělené na několik částí. Každá krátká preamble obsahuje adresu cíle a počet zbývajících preamble, které odesílatel ještě odešle.

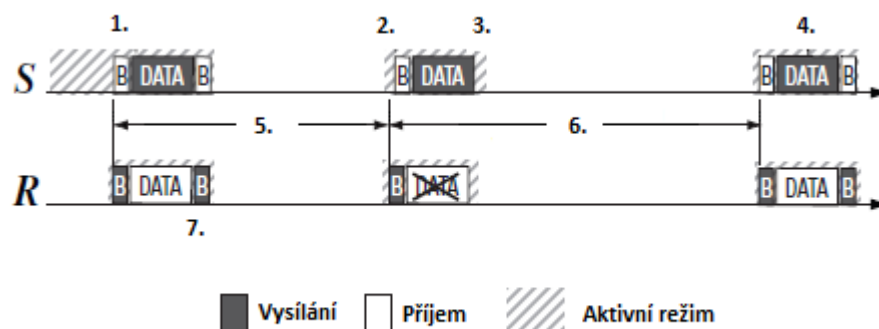


Obrázek 12 - Porovnání LPL-MAC a X-MAC s rozděleným preamble

Pokud příjemce zachytí preamble, okamžitě se dozví, zda je pro něj a nemusí čekat na její celé dokončení. Pokud pro něj zpráva není, přepne se příjemce do spacího režimu. Pokud je zpráva určená pro něj, zašle odesílateli ACK rámeček aby mu sdělil, že je v aktivním režimu, naslouchá a je připraven obdržet zprávu. Celý proces přenosu dat je znázorněn na Obrázku 12.[9]

4.4 PW-MAC

PW-MAC (Predictive Wakeup MAC) je další asynchronní protokol, který je navržený ke snížení spotřeby energie tím, že umožní odesílatelům odhadnout čas vzbuzení příjemce, a řeší problémy s časovou synchronizací. Stanice se budí v pseudonáhodných intervalech, tyto intervaly jsou generovány samotnou stanicí a jsou tedy pro každou stanicí odlišné. Tento parametr je odesílán sousedním uzlům jako součást tzv. beacon rámečku. Uzel, který zná parametry pseudonáhodné funkce souseda, dokáže odhadnout budící čas a podle toho si přizpůsobit svůj cyklus.[12]



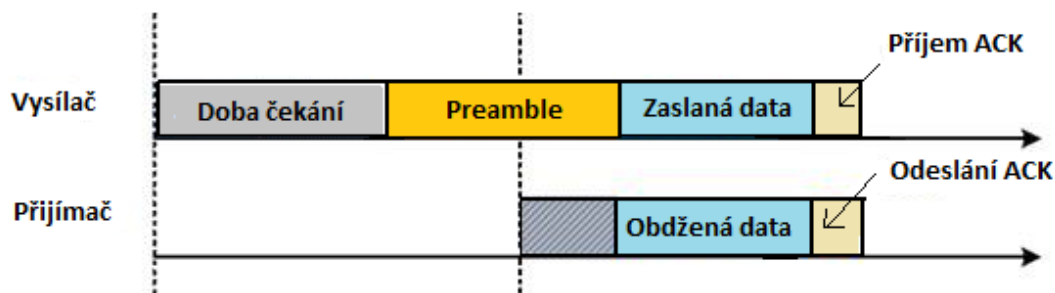
Obrázek 13 - Průběh komunikace PW-MAC protokolu

1. Nastaví prediktivní příznak
2. Buzení v odhadnutý čas
3. Detekce chyby v přenosu
4. Opakované přeposlání dat
- 5– 6. Pseudonáhodný budící interval
7. Odeslání prediktivního příznaku v beaconu

4.5 WISE-MAC

WISE-MAC spadá do skupiny protokolů soupeřících o přenosové médium (contention based) a tento protokol používá techniku Preamble sampling ke zmírnění ztráty energie při nadbytečném naslouchání. Myšlenka WISE-MAC protokolu je minimalizovat délku budící preamble a dát ostatním uzlům vědět svůj budící rozvrh. Toto ale platí pouze pro určité uzly v určitém směru. Pakliže má uzel jen pár přímých směrů, kam může vysílat,

Lze snadno udržovat tabulku s časovým posunem budících rozvrhů jiných uzlů i na omezeném hardwaru, jakým senzorové uzly jsou.



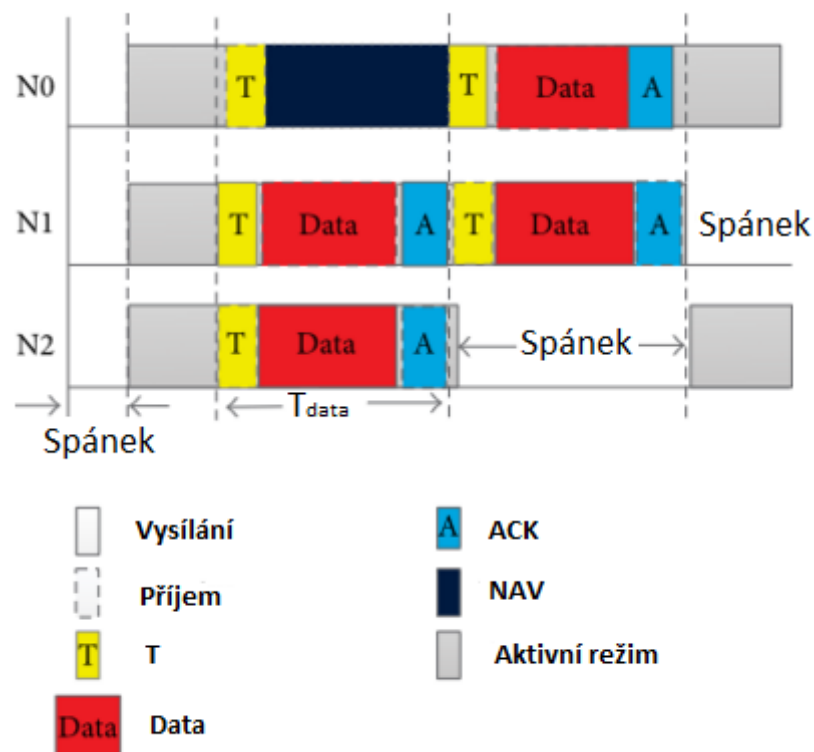
Obrázek 14 - Výměna zprávy u protokolu WISE-MAC

WISE-MAC je adaptivní co se týče provozu po síti a přitom udržuje nízkou spotřebu energie. V rámci výzkumu týmu Amre El-Hoiydi a Jean-Domique Decotignie porovnávali protokoly WISE-MAC s S-MAC a T-MAC. Ze simulace provedené výzkumným týmem vyplývá, že WISE-MAC protokol spotřebuje 3.8krát méně energie při komunikaci mezi uzly, než zmíněné další dva protokoly.[13]

4.6 CH-MAC

Dalším duty-cycle synchronizačním protokolem je CH-MAC (Compressed Handshake Media Access Control). Tento protokol představuje mechanismus, který umožňuje uzlům během aktivního režimu přenášet data efektivněji a rychleji a tím spotřebovat méně energie. Principem je zredukování nadbytečných režijních rámců vznikajících během přenosu dat. Protokol CH-MAC také snižuje latenci při přenosu nahrazením kontrolních rámců RTS a CTS pouze jedním rámcem nazvaným T rámcem.[14]

V intervalu T_{data} soupeří uzel, který chce vysílat, o přístup ke sdílenému přenosovému médiumu klasickým mechanismem handshake (=ustanovení spojení výměnou rámců), ale s tím rozdílem, že RTS/CTS jsou nahrazeny T rámcem.



Obrázek 15 - Rozvrh přenosu dat u protokolu CH-MAC

4.6.1 Přenos dat u CH-MAC protokolu

Zamýšlený příjemce N1 pošle T rámec s požadavkem na přenos dat (viz Obrázek 15). Pokud je přenosové médium volné, odesílatel N2 odpoví datovým rámcem, který mu N1 potvrdí rámcem ACK. N2 obdrží ACK rámec a ihned na to se přepne do režimu spánku. Vzbudí se na konci přenosu mezi uzly N1 a N0. Mezitím N0 odhadne časovou náročnost přenosu dat mezi N2 a N1, nastaví si časový parametr NAV (Network Access Vector) a po jeho vypršení se probudí.

4.6.2 T rámec

T rámec má 2 úlohy: posílá se jako potvrzovací rámec ACK na obdržený požadavek a je to implicitní požadavek na inicializaci přenosu dat.

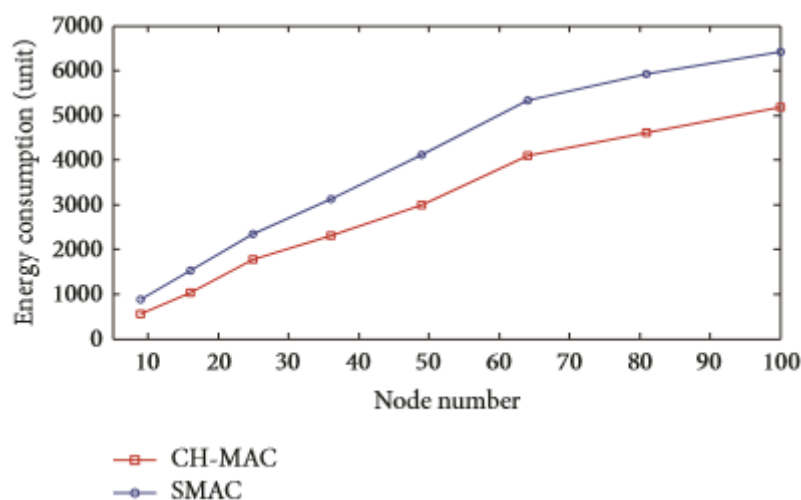
Jeho struktura vypadá následovně:



Obrázek 16 - Struktura T rámce

4.6.3 Srovnání parametrů CH-MAC protokolu

Výzkumná skupina, Zhe-tao Li a kolektiv, která navrhla CH-MAC protokol, testovala různé parametry v simulačním prostředí Omnet++. Jednalo se o topologii mesh, kde byly ve čtyřech rozích vždy po jednom zdrojovém uzlu, který každou sekundu generoval datový packet. Skupina srovnávala protokol se známým S-MACem a došla k výsledku, že při hloubce sítě od 3x3 až po 10x10 je CH-MAC o **27%** méně energeticky náročný, než S-MAC (viz. Obrázek 17).[14]



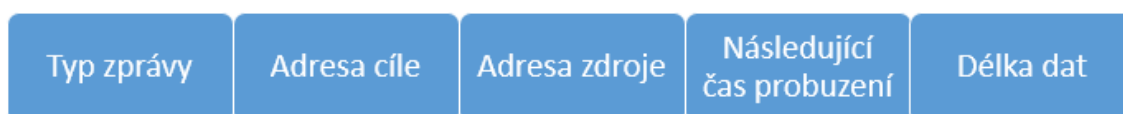
Obrázek 17 - Graf spotřeby energie při simulaci (převzato ze studie)

4.7 WX-MAC

Tento asynchronní protokol kombinuje výhody předchozích WISE-MAC a X-MAC protokolů. Jedná se o efektivní protokol, který kombinuje rozdrobenou preamble obsahující adresu cíle, jako používá X-MAC a odhad začátku vysílání preamble, což používá WISE-MAC.[15]

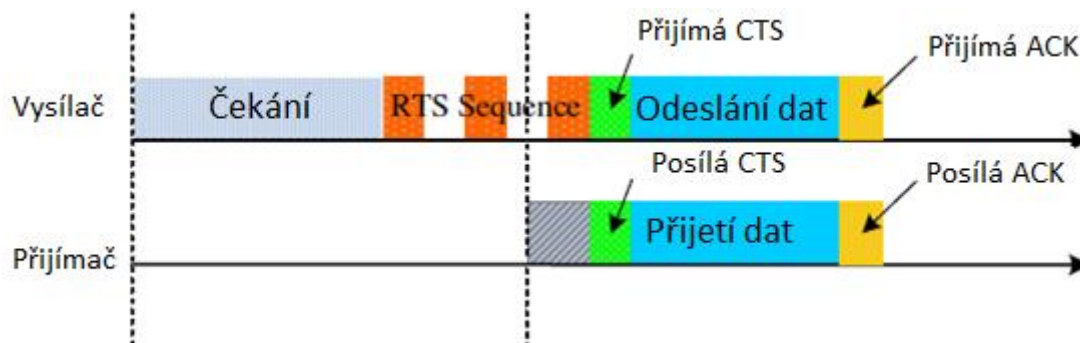
4.7.1 Struktura protokolu WX-MAC

WX-MAC používá kontrolní rámce RTS/CTS a dále speciální odpovědi NQM (Neighbor query message) a NIM (Neighbor inform message). Struktura těchto zpráv se skládá z 5 částí:



Obrázek 18 - Formát kontrolního rámce WX-MAC protokolu

Preamble je tvořena mezerami a sérií RTS rámců. Níže znázorněný Obrázek 18 ukazuje rozdrobenou preamble, která začíná později díky odhadu času, kdy se má vzbudit příjemce. Zkrácením doby, po kterou odesílatel vysílá rozdrobenou preamble se ušetří značné množství energie. Navíc může příjemce odeslat CTS rámec a tím přimět odesílatele, aby neposílal zbytek preamble, ale rovnou začal odesílat data.



Obrázek 19 - Přenos dat u protokolu WX-MAC

Uzly WX-MAC protokolů si vyměňují časové rozvrhy mechanismem dotaz/odpověď. Uzel vyšle broadcastem NQM a očekává od sousedů NIM zprávy. Tímto si uzly uloží časový rozvrh všech sousedů a ví, kdy se kdo probudí. Uzel si také může vyměnit informace přímo s určitým sousedem, kdy namísto broadcastu vyšle NQM s určitou adresou. Díky NIM zprávě odesílatel získá a uloží si 3 záznamy:

- ID – sousedova adresa
- T0 – rozdíl oproti časovému rozvrhu
- Tr – přesný čas nahrání T0

Díky těmto údajům může vysílající uzel odhadnout čas probuzení příjemce.

4.7.2 Srovnání parametrů WX-MAC protokolu

WX-MAC byl porovnáván simulací ve studii WX-MAC: An Energy Efficient MAC protocol for Wireless Sensor Networks (Xiao Han a spol.) s dalšími MAC protokoly: B-MAC, WISE-MAC a X-MAC. Simulace byla prováděna ve studiu NS-2 a byla zaměřena na porovnání všech protokolů z hlediska spotřeby energie, měřeno v mJ. [15]

Parametry simulace byly:

Délka duty cycle 100 až 1000 ms. Délka zprávy 50 byte

Spotřeba energie pro jednotlivé úkony hardware:

vysílání: 0.66mW

příjem: 0.36mW

nečinný stav: 0.35mW

spánek: 0.001mW

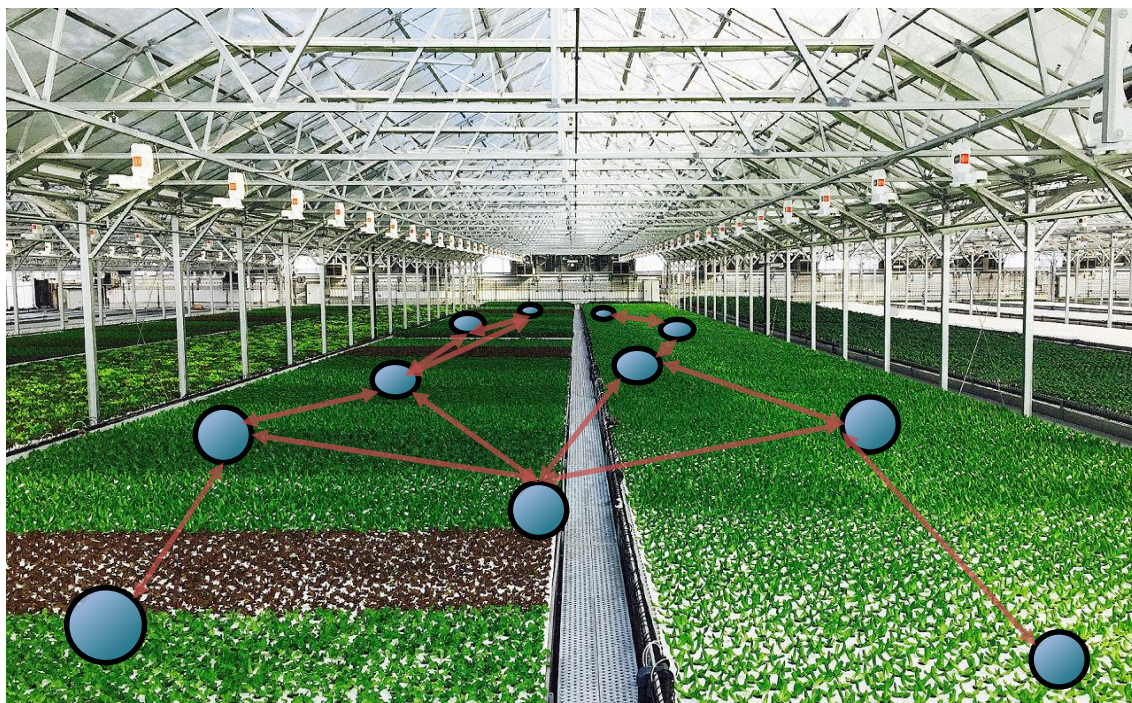
	Spotřeba v mJ
B-MAC	200
X-MAC	85
WISE-MAC	75
WX-MAC	65

Tabulka 1 - Porovnání výsledků B-MAC, X-MAC, WISE-MAC, WX-MAC

5 NÁVRH PROTOKOLU

5.1 Použití bezdrátové senzorové sítě

Bezdrátové sítě je možno použít v nesčetně případech. Mohou být využity při monitorování prostředí z důvodu zabezpečení, monitorování nosníků mostů, měření fyzikálních veličin v přírodě nebo ve skleníku při optimalizaci podmínek pro růst plodin (viz Obrázek 18). Taktéž je možné je použít v průmyslovém odvětví, v továrních halách a podobně. Může se jednat o měření prašnosti prostředí, vlhkosti, teploty, měření kvality vody nebo jako protipožární alarm v lesích. Tyto měřené veličiny se nemění skokově, a tak posílání dat není podmíněno událostí. Pro velké plochy nebo těžce přístupná místa lze tedy využít bezdrátovou senzorovou síť a měřit veličiny v určitých intervalech.



Obrázek 20 - Rozmístění senzorů ve skleníku

Nejdůležitější aspekt při návrhu a aplikaci senzorové bezdrátové sítě je energetická spotřeba. Je důležité, aby hardwarová i softwarová část byla co nejlépe navržena jen pro takové úkony, které se budou opravdu používat. Tím se vyhneme nadměrnému plýtvání energie pro funkce, které nejsou stěžejní pro naše účely. Pro mnoho aplikací dostačuje použít nízkoenergetické 8 bitové čipy a paměti s několika desítkami kB.

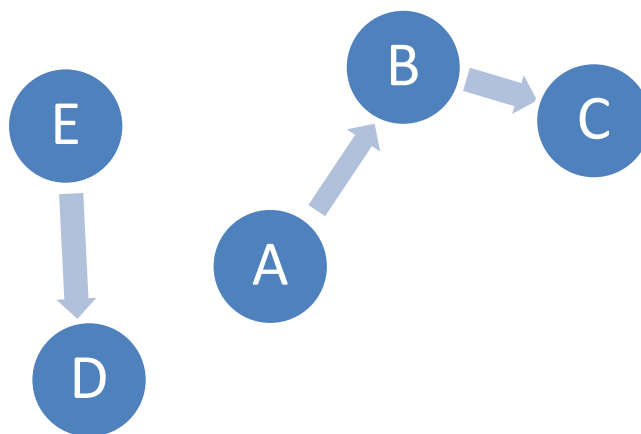
Mnoho dnešních protokolů se nezaměřuje přímo na energetickou náročnost, ale na využití více přenosových kanálů, na využití fullplexu anebo existují tzv. traffic-aware protokoly, které se přizpůsobují velikosti provozu na síti. Nepřeberné množství se ale stále zajímá o snížení energetické spotřeby, jelikož čím menší bude spotřeba energie, tím větší bude životnost senzorové sítě. V problematice bezdrátových sítí je toto jednou z priorit.

Je mnoho mechanismů a algoritmů na snížení spotřeby energie a snížení latence při přenosu. Pokud například zmenšíme délku vysílaných rámců, zařízení bude aktivní po kratší čas, a tím se sníží jak energetická spotřeba, tak i latence. Z toho jsem vycházel při návrhu adaptovaného protokolu.

5.2 Návrh hybridního protokolu

Základ protokolu tvoří existující a v kapitole 4.7 popsany WX-MAC, který je jedním z novějších protokolů zabývajících se snížením spotřeby energie. Asynchronní WX-MAC je už sám o sobě hybridním protokolem, využívajícím výhod WISE-MACu a X-MACu, a i provedené simulace s jinými protokoly dokazují, že je energeticky méně náročný, než klasické protokoly. Vycházel jsem při návrhu z poznatku, že WX-MAC používá klasické rámce RTS a CTS a právě tyto kontrolní rámce odstraňuje CH-MAC a zavádí T rámec. Tímto skloubením obou protokolů dojde k další významné úspoře energie, jelikož se zkrátí handshake a tím i doba potřebná pro vysílání/přijímání.

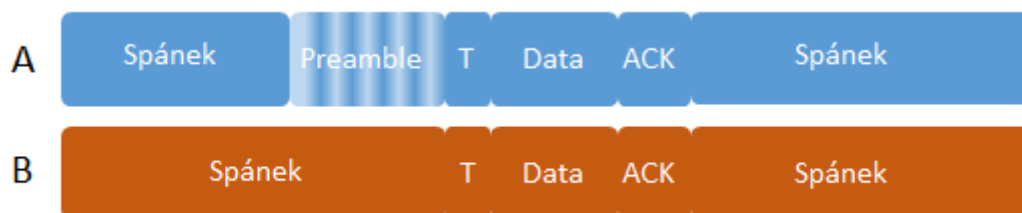
Stejně jako WX-MAC, je i navrhovaný hybridní protokol asynchronní. Výjimkou je stav při kolizi. Pokud při přenosu dat dojde ke kolizi, postižené uzly čekají náhodnou dobu, než se pokusí soupeřit o médium. Do pseudonáhodného čekacího času započtou svou unikátní MAC adresu. Tím vznikne pro každý uzel náhodná doba, kdy budou čekat, než budou naslouchat, zdali je přenosové médium volné. Pokud má uzel data k poslání, zná adresu svého cíle (nebo next hopu) a tuto adresu započte při výpočtu pseudonáhodného čekacího intervalu. Tím se dosáhne toho, že 2 uzly budou mít totožnou čekací dobu a oba se probudí zároveň a odesílatel vyšle T rámec s požadavkem na přenos dat. Pokud jsou při kolizi ovlivněny 3 uzly, přičemž A chce vysílat na B a ten chce vysílat na C, při zmíněné technice by se všechny 3 probudily současně a B a C by oba obdržely T rámec se žádostí o přenos dat. S využitím vícenásobného přístupu TDMA se použijí 2 časové sloty, jeden pro odesílání a druhý pro příjem. Tímto A odešle T rámec k B a ten zároveň odešle T rámec k C (viz Obrázek 20). V přijímacím časovém slotu B obdrží T rámec od A a C obdrží T rámec od B.



Obrázek 21 - Komunikace mezi uzly A, B, C

5.2.1 Postup při přenosu dat:

- uzel A se vzbudí, vygeneruje zprávu, zamýšleným příjemcem je uzel B
- začne vysílat rozdrobenou preamble, která obsahuje 16 bitovou adresu uzlu B
- uzel B se náhodně probudí, zachytí preamble, pozná, že je komunikace určena pro něj a vyšle T rámeček uzlu A
- uzel A zachytí T rámeček, přeruší vysílání preamble a zašle uzlu B zamýšlená data
- uzel B data obdrží, odešle uzlu A potvrzovací rámeček ACK a přepíná se do režimu spánku na stanovený interval
- uzel A obdrží ACK a přepíná se do režimu spánku na stanovený interval



Obrázek 22 - Průběh přenosu dat u hybridního protokolu

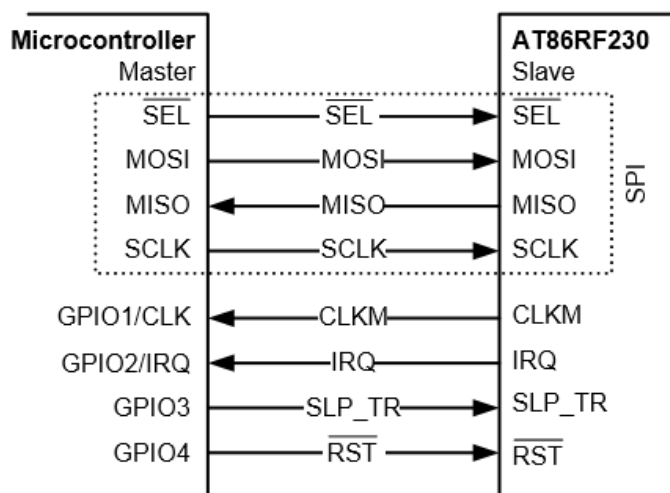
6 IMPLEMENTACE PROTOKOLŮ

6.1 Zařízení

K dispozici mi byly zapůjčeny senzorové uzly XM2110 od firmy MEMSIC (dřívější Crossbow), USB brány MIB520 taktéž od firmy Crossbow, a debugger JTAGICE3 od firmy Atmel.

6.1.1 IRIS – XM2110

Tento bezdrátový komunikující uzel pracuje v pásmu 2,4GHz a splňuje normu IEEE802.15.4. Byl navržen pro nízkoenergetické bezdrátové aplikace. Srdcem zařízení je dvojice čipů ATmega1281 a RF230 (viz Tabulka 2). Ty spolu komunikují přes sběrnici ISP, jejíž piny jsou vyznačeny na obrázku níže přerušovaným obdélníkem.[16][17]



Obrázek 23 - Propojení pinů MCU a RF čipu [18]

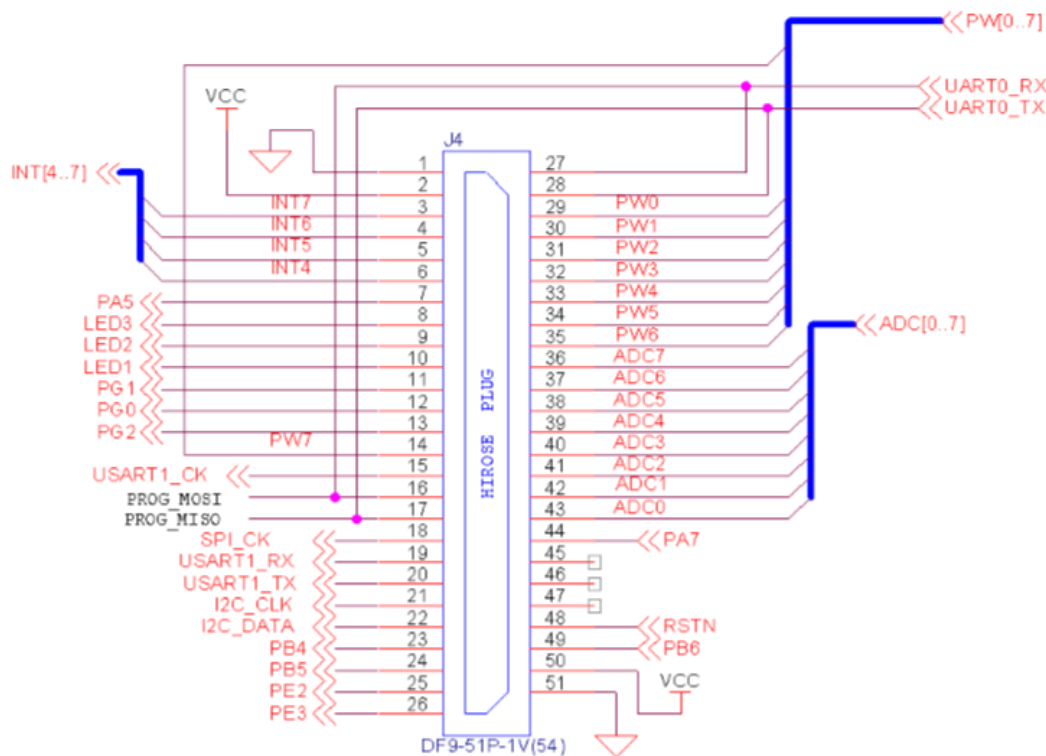


Obrázek 24 - Pohled na senzorový uzel IRIS XM2110

ATmega1281		AT86RF230	
Programová flash	128kB	Frekvenční pásmo	2405-2480 MHz
Sériová flash	512kB	Přenosová rychlost	250kb/s
RAM	8kB	Spotřeba proudu	
EEPROM	4kB	Aktivní režim	8mA
Rozhraní	UART, I2C, SPI	Režim spánku	8μA
		Příjem	16mA
		Vysílání	10mA

Tabulka 2 - Technické specifikace dvojice čipů v senzorovém uzlu [17]

IRIS jednotka je osazena 51 pinovým konektorem pro spojení analogových výstupů, sběrnicemi a UART rozhraní.



Obrázek 25 - Znázornění a popis jednotlivých pinů konektoru na senzoru [17]

Napájení senzoru je řešeno pomocí dvou tužkových AA baterií nebo pomocí konektoru USB.

6.1.2 MIB520

MIB520 se 51 pinovým konektorem připojí se senzorem IRIS, a slouží poté senzoru jako brána k přenosu dat, případně dokáže poskytovat napájení díky USB. Brána je k počítači připojena 10-ti pinovým JTAG konektorem skrze debugger.

6.2 Implementace

Při snaze na zapůjčené zařízení implementovat WX-MAC protokol jsem se setkal s několika obtížemi. Ve studii týmu, který navrhl WX-MAC protokol chybí přesně popsany algoritmus. Tým zmiňuje obecný princip protokolu, výměnu zpráv a hrubou strukturu, ale opomíjí popis přesných specifikací, podle nichž by bylo možné WX-MAC věrně naprogramovat. Zdrojové soubory taktéž nejsou veřejné. Pokusil jsem se tedy o úpravu a přepsání MAC protokolu IEEE802.15.4 do cílové podoby WX-MAC protokolu. Příloha 1 tedy obsahuje MAC vrstvu vytvořeného protokolu.

```
typedef struct MACIb_t //MAC Layer parameters
{
    uint16_t localaddr; //address of the node
    uint16_t panId; //pan ID of the mesh
    uint8_t macSeqNum; //mac sequence#
    uint16_t localT0; //local node offset in ms
    uint16_t Neighboraddr;
    uint16_t NeighborT0; //offset of neighboring node in ms
    uint16_t sampletick; //time marker in current sampling interval for
neighboring node NIM
} MACIb_t;

extern MACIb_t macIb_t; //object of MACIb

void MAC_Init(void); //init MAC Layer
void MAC_SetAddr(uint16_t addr); //set address of node (short address)
void MAC_SetPanId(uint16_t panId); //set PANID
void MAC_SleepReq(void); //Enter the radio to sleep
void MAC_WakeupReq(void); //Wake up radio
void MAC_TaskHandler(void); //periodic check for MAC Tx, Rx and time
based services
#endif /* MAC_H_ */
```

Uvedený výtažek z kódu obsahuje vytvoření struktury a objektu. Nastavuje 16 bitovou adresu uzlu, PANID a uvádí funkce pro usnutí uzlu, přepnutí uzlu do aktivního režimu a pravidelné kontroly kanálu.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá rozsáhlou problematikou bezdrátových senzorových sítí, jejich vysvětlením a přiblížením čtenáři. V první kapitole jsou popsány bezdrátové senzorové sítě a používaný standard IEEE802.15.4 společně se sítíovou topologií. Druhá kapitola popisuje nejčastější příčiny nadměrné spotřeby energie při přenosu dat a dále uvádí techniky k zamezení těchto negativních vlivů. Prozkoumává tedy možné příčiny krátké životnosti bezdrátové senzorové sítě a popisuje možnosti, jak energetickou spotřebu snížit. Tyto mechanismy pro úsporu energie jsou používány většinou MAC protokolů, které se specializují právě na snížení energetické spotřeby. Následně práce rozděluje velké množství MAC protokolů do kategorií a popisuje některé MAC protokoly se zaměřením na vybrané současné MAC protokoly, které srovnává díky výsledkům simulace z uvedených studií.

Práce dále popisuje zařízení, na kterém proběhlo testování vytvářeného protokolu. Jednalo se o senzorový modul IRIS XM2110 od firmy MEMSIC. Při vytváření MAC protokolu a jeho testování se objevily četné problémy, zejména absence přesně popsaného algoritmu protokolu, který byl vybrán a zamýšlen použit jako předloha. Jelikož nejsou zdrojové kódy k tomuto protokolu veřejné, tuto předlohu, WX-MAC protokol, autor vytvořil úpravou standardu IEEE802.15.4.

MAC vrstva byla tedy vytvořena podle standardu IEEE802.15.4 a vybraného WX-MAC protokolu a může být použita při řešení komunikace mezi senzory v bezdrátové síti. Autor v práci nastiňuje úvahu při návrhu nového protokolu a navrhuje hybridní protokol. Přitom využívá sesbíraných teoretických poznatků z rozsáhlé problematiky bezdrátových senzorových sítí a mechanismů pro úsporu energie. Výsledný návrh je adaptací jednoho z nejnovějších MAC protokolů se zavedením technik pro snížení spotřeby energie při komunikaci v bezdrátových senzorových sítích.

Práce seznámila čtenáře s bezdrátovými senzorovými sítěmi i s největší problematikou, která se v nich vyskytuje. Čtenář získal potřebné znalosti k pochopení popsaných problémů a v 6 kapitolách práce se dozvěděl základní informace o bezdrátových senzorových sítích a jejich problematice, používaných protokolech s uvedením využitých technik a nakonec s návrhem vlastního hybridního protokolu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Blokové znázornění zařízení ve WSN	11
Obrázek 2 - Používané topologie ve WSN	12
Obrázek 3 - Přehled vrstev u standardu IEEE802.15.4	13
Obrázek 4 - Aktivní a spací režim protokolu s technikou Duty cycle	16
Obrázek 5 - Rozdělení Contention based protokolů na synchronní a asynchronní	16
Obrázek 6 - Přenos dat u synchronních protokolů	17
Obrázek 7 - Přenos dat u asynchronních protokolů	18
Obrázek 8 - Přehled a členění MAC protokolů	19
Obrázek 9 - SYNC rámec S-MAC protokolu	20
Obrázek 10 - Struktura S-MAC rámce	20
Obrázek 11 - Duty cycle T-MAC protokolu	21
Obrázek 12 - Porovnání LPL-MAC a X-MAC s rozděleným preamble	21
Obrázek 13 - Průběh komunikace PW-MAC protokolu	22
Obrázek 14 - Výměna zprávy u protokolu WISE-MAC	23
Obrázek 15 - Rozvrh přenosu dat u protokolu CH-MAC	24
Obrázek 16 - Struktura T rámce	24
Obrázek 17 - Graf spotřeby energie při simulaci (převzato ze studie)	25
Obrázek 18 - Formát kontrolního rámce WX-MAC protokolu	25
Obrázek 19 - Přenos dat u protokolu WX-MAC	26
Obrázek 20 - Rozmístění senzorů ve skleníku	28
Obrázek 21 - Komunikace mezi uzly A, B, C	29
Obrázek 22 - Průběh přenosu dat u hybridního protokolu	30
Obrázek 23 - Propojení pinů MCU a RF čipu	31
Obrázek 24 - Pohled na senzorový uzel IRIS XM2110	31
Obrázek 25 - Znázornění a popis jednotlivých pinů konektoru na senzoru	32
Obrázek 26 - Obsah dat na přiloženém DVD	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Porovnání výsledků B-MAC, X-MAC, WISE-MAC, WX-MAC	27
Tabulka 2 - Technické specifikace dvojice čipů v senzorovém uzlu.....	32

SEZNAM LITERATURY

- [1] KREIBICH, Ondřej a Jan NEUŽIL. Bezdrátové senzorové sítě. In: *Mmspektrum* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/bezdratove-senzorove-site.html>
- [2] BACHIR, Abdelmalik, Mischa DOHLER, Thomas WATTEYNE a Kin K LEUNG. MAC Essentials for Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2010, 12(2), 222-248 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/SURV.2010.020510.00058. ISSN 1553-877x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5451759>
- [3] SPONSOR, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. *IEEE standard for local and metropolitan area networks*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. ISBN 9780738172255.
- [4] XIA, Feng a Azizur RAHIM. *MAC Protocols* [online]. s. 11 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1007/978-3-662-46361-1_2. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-46361-1_2
- [5] ŠIMEK, Milan. *Bezdrátové senzorové sítě* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-25]. Elektronická skripta. VUT Brno.
- [6] CARRANO, Ricardo C., Diego PASSOS, Luiz C. S. MAGALHAES a Celio V. N. ALBUQUERQUE. Survey and Taxonomy of Duty Cycling Mechanisms in Wireless Sensor Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2014, 16(1), 181-194 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/SURV.2013.052213.00116. ISSN 1553-877x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6524461>
- [7] LANGENDOEN, Koen. Medium access control in wireless sensor networks. *Medium access control in wireless networks*, 2008, 2: 535-560.
- [8] VIKAS a Parma NAND. Contention based energy efficient wireless sensor network — A survey. In: International Conference on Computing, Communication & Automation [online]. IEEE, 2015, s. 546-551 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/CCAA.2015.7148438. ISBN 978-1-4799-8890-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7148438>
- [9] BUETTNER, Michael, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks. In: Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2006. p. 307-320.
- [10] SINGH, Himanshu a Bhaskar BISWAS. *COMPARISON OF CSMA BASED MAC PROTOCOLS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS* [online]. , 10 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1205/1205.1701.pdf>
- [11] KR. TYAGI, Pushpendra, Vijay MAHESHWARI a Mohit UPADHYAY. *Introduction to TMAC Protocol with Reduction Function for Wireless Sensor Networks* [online]. , 7 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: www.ijarcse.com
- [12] TANG, Lei, Yanjun SUN, Omer GUREWITZ a David B. JOHNSON. PW-MAC: An energy-efficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks. In: *2011 Proceedings IEEE INFOCOM* [online]. IEEE, 2011, s. 1305-

- 1313 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/INFCOM.2011.5934913. ISBN 978-1-4244-9919-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5934913>
- [13] EL-HOIYDI, Amre; DECOTIGNIE, Jean-Dominique. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for multi-hop wireless sensor networks. In: *Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks*. Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 18-31.
- [14] LI, Zhe-tao, Qian CHEN, Geng-ming ZHU, Young-june CHOI a Hiroo SEKIYA. A Low Latency, Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks* [online]. 2015, **2015**, 1-9 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1155/2015/946587. ISSN 1550-1329. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/946587/>
- [15] HAN, Xiao, Lei SHU, Yuanfang CHEN a Hairui ZHOU. WX-MAC: An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems* [online]. IEEE, 2013, s. 423-424 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1109/MASS.2013.15. ISBN 978-1-4799-3408-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6680274>
- [16] MEMSIC. *IRIS: Wireless Measurement System* [online]. , 2 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/IRIS_Datasheet.pdf
- [17] MEMSIC. *Mote Processor Radio & Mote: Interface Boards User Manual* [online]. , 39 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.memsic.com/userfiles/files/User-Manuals/mpr-mib_series_users_manual-7430-0021-09_a-t.pdf
- [18] Low Power 2.4 GHz Transceiver for ZigBee, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, RF4CE and ISM Applications: AT86RF230. In: *Atmel* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc5131.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ



ACK	Acknowledgment Potvrzovací rámec
B-MAC	B-MAC B-MAC protokol
CDMA	Code Division Multiple Access Mnohonásobný přístup kódovým dělením
CSMA/ARC	Carrier Sense Multiple Access/Adaptive Rate Control Mnohonásobný přístup s nasloucháním nosné s adaptivním s adaptivní hodnotící kontrolou
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance Mnohonásobný přístup s nasloucháním nosné a s vyhýbání se kolizím
CTS	Clear to send Volno k odeslání
FDMA	Frequency Division Multiple Access Mnohonásobný přístup frekvenčním dělením
CH-MAC	Compressed Handshake Media Access Control CH-MAC protokol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
LLC	Logical Link Control Řízení logického spoje
LPL	Low Power Listening Nízko-energetické naslouchání
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network Bezdrátová zařízení s malým dosahem
MAC	Medium Access Control Kontrola přístupu k médiu
MACA	Multiple Access with Collision Avoidance Mnohonásobný přístup s vyhýbáním kolizí
MiWi	MiWi

MPDU	Mac Protocol Data Unit Datová jednotka MAC vrstvy
NIM	Neighbor inform message Informační zpráva
NQM	Neighbor query message Dotazová zpráva
Omnet++	Omnet++
PAMAC	Power Aware Multi-Access with Signaling Protokol pro mnohonásobný přístup se signalizací
PW-MAC	Predictive Wakeup MAC PW-MAC protokol
RTS	Request to send Požadavek na odeslání dat
S-MAC	S-MAC protokol
SYNC	Synchronization Synchronizace
TDMA	Time Division Multiple Access Mnohonásobný přístup časovým dělením
T-MAC	T-MAC T-MAC protokol
WirelessHART	
WISE-MAC	WISE-MAC WISE-MAC protokol
WSN	Wireless sensor networks Bezdrátové senzorové sítě
WX-MAC	WX-MAC WX-MAC protokol
X-MAC	X-MAC X-MAC protokol
ZigBeeZigBee	

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah dat na přiloženém DVD

OBSAH DAT NA PŘILOŽENÉM DVD

Název	Datum změny	Typ	Velikost
 DP_Michalek_Tomas	25.5.2016 3:20	Soubor PDF	1709 kB
 mac_vrstva	25.5.2016 3:19	Složka souborů	
<div> <div>Název</div> <div> <div>macTx</div> <div>macTx</div> <div>macRx</div> <div>macRx</div> <div>macFrame</div> <div>macCommand</div> <div>mac</div> <div>mac</div> </div> </div>	<div> <div>24.5.2016 22:38</div> <div>24.5.2016 22:37</div> <div>24.5.2016 22:30</div> <div>25.5.2016 2:50</div> <div>24.5.2016 22:12</div> <div>24.5.2016 22:10</div> <div>25.5.2016 2:50</div> <div>25.5.2016 2:50</div> </div>	<div> <div>Soubor H</div> <div>C Source File</div> <div>Soubor H</div> <div>C Source File</div> <div>Soubor H</div> <div>Soubor H</div> <div>Soubor H</div> <div>C Source File</div> </div>	<div> <div>1 kB</div> <div>10 kB</div> <div>1 kB</div> <div>7 kB</div> <div>2 kB</div> <div>2 kB</div> <div>1 kB</div> <div>3 kB</div> </div>

Obrázek 26 - Obsah dat na přiloženém DVD